REALISMO CIENTIFICO Y CIENCIA REAL†
(*Scientific Realism and Scientific Practice*)

Roberto TORRETTI*

Recibido: 1996.3.30.

* Casilla 20017, Correo 20, Santiago, Chile. E-mail: cordua@mailnet.rdc.cl

BIBLID [ISSN 0495-4548 (1996) Vol. 11: No 26; p. 29-43]

RESUMEN: Se distingue entre 'cosas reales' en el sentido ordinario de *pragmata*, intrínsecamente vinculadas a la práctica de la vida, y en la acepción técnica, de inspiración teológica, en que entiende la expresión el llamado "realismo cienífico". Este concibe a la realidad como algo bien definido independientemente de la acción y el pensamiento humanos y, sin embargo, capaz de ser descrito adecuadamente en un lenguaje humano. Tras ridiculizar esta idea, el artículo examina algunos ejemplos, tomados principalmente de la teoría de la gravitación, que demuestran que la ciencia, en su práctica efectiva, busca entender la realidad en el sentido ordinario (pragmático) de la palabra, no en el sentido artificial que le dieron los teólogos del medioevo y los realistas científicos.

Descriptores: realismo científico, pragmatismo, relatividad general, espacio-tiempos observacionalmente indiscernibles, Mercurio: precesión del perihelio, hoyos negros, radiación de pesos atómicos.

ABSTRACT: *A distinction is made between real things in their ordinary sense as* pragmata *-inherently linked to our living praxis- and in the technical, theologically inspired sense of so-called scientific realism. In the latter sense reality is supposed to be well-defined independently of human action and human thought, and yet to be adequately describable in human language. After pouring ridicule on this idea, the paper discusses some examples, mainly from gravitational physics, which show that in actual practice science seeks to understand reality in the ordinary (pragmatic) meaning of the word, not in the contrived meaning bestowed on it by medieval theologians and scientific realists.*

Keywords: *Realism, Scientific, Pragmatism, General Relativity, Mercury: Perihelion precession, Observationally undistinguishable spacetimes, Black hole radiation, Atomic weights.*

Usaré la palabra 'ciencia' para referirme a la física matemática y experimental y a las otras ciencias naturales en la medida en que se basan en la física y se nutren, en parte, de sus hallazgos. Al adoptar esta acepción restringida no pretendo excluir como minusválidas a otras ramas del saber. Lejos de ello. Pero 'ciencia', aunque proviene del latín 'scire', que simplemente significa 'conocer', ha llegado a emplearse en el habla corriente en el sentido antedicho. Por ejemplo, si una mamá le cuenta a otra que su hijo se dedica a la ciencia su

interlocutora no se imaginará que el muchacho se pasa los días analizando documentos notariales en el Archivo de Indias. Además, la controversia sobre el realismo científico no se plantea fuera de la física y sus parientes cercanas. Los historiadores podrán preguntarse si Cristóbal Colón desembarcó *realmente* en Aguadilla el 19 de noviembre de 1493, pero tanto ellos como los filósofos de la historia tienen una noción muy firme y clara de lo que significa una respuesta afirmativa a esta pregunta. En cambio, desde hace más de un siglo se discute, a veces con pasión, sobre la índole misma de la realidad que la física atribuye a sus objetos primordiales, partículas y campos, potenciales, fuerzas; y en la discusión no sólo toman parte filósofos que contemplan la física viva como aficionados, desde sus asientos, sino también y muy comprometidamente algunos físicos de primera línea: Poincaré, Einstein, Eddington, Bohr, Schrödinger, Heisenberg.

La cuestión disputada puede expresarse así: los sustantivos y pronombres utilizados en el discurso científico ¿nombran entes realmente existentes o se refieren a "constructos", creados por la imaginación científica? Pero el llamado "realismo científico" no se contenta con la simple aceptación de la primera alternativa, en el sentido liso y llano de 'real' que aplicamos a las cosas cotidianas que los romanos llamaban *res* y los griegos *pragmata*. Nuestros autodenominados realistas exigen que los objetos del conocimiento científico sean reales en un sentido más fuerte que las cosas de la vida común y corriente, como mis dos manos o una manzana olorosa y colorada, las cuales existen, según ellos, de prestado, como manifestaciones humanamente condicionadas de lo realmente real. Los realistas científicos remontan gustosos su genealogía al filósofo atomista griego Demócrito, quien decía: "Por costumbre, dulce; por costumbre, amargo. Por costumbre, caliente; por costumbre, frío. Por costumbre, color. En realidad: átomos y vacío" (fr. 9, fr. 125). Ya en los albores de la ciencia moderna Galileo proclamó vigorosamente que los rasgos más notorios de la realidad cotidiana dependen de la presencia del hombre:

> Que para excitar en nosotros los sabores, los olores y los sonidos se requiera en los cuerpos externos otra cosa que tamaño, figuras, pluralidad y movimientos lentos o rápidos, no lo creo; y estimo que si se quitan las orejas, las lenguas y las narices, quedan por cierto las figuras, los números y los movimientos, mas no ya los olores, sabores y sonidos, los cuales fuera del animal vivo no creo que sean más que nombres, tal como la cosquilla no es más que un nombre si se remueve la axila y la mucosa nasal. (Galileo, *Il Saggiatore*, §48 [EN, VI, 350])

Galileo le dio a esta doctrina democrítea un giro pitagórico que sigue siendo característico de la física. El Libro de la Naturaleza, dijo, "está escrito en lenguaje matemático, y sus caracteres son triángulos, círculos y otras figuras geométricas, sino las cuales es humanamente imposible entender de él ni una palabra" (*Il Saggiatore*, §6 [EN, VI, 232]). Por consiguiente, como diríamos hoy, lo realmente real puede representarse adecuadamente como una estructura

matemática. Esta visión la tuvo también Descartes, quien la incorporó en el cuadro de su metafísica dualista. Estos hombres de ciencia del siglo XVII eran a la vez cristianos devotos y creían que Dios, como un arquitecto renacentista, había concebido un diseño geométrico conforme al cual había creado el universo. Su ciencia busca recuperar ese plano divino de la naturaleza. Pascal se quejó de que era "incierto, inútil y penoso" reducir todas las cosas naturales a "número, figura y movimiento"; pero esa reducción, favorecida abiertamente en Inglaterra por el ilustre Robert Boyle y sus amigos de la Royal Society, fue adoptada por Locke en su muy leído *Ensayo sobre el entendimiento humano* y llegó a ser una característica distintiva del realismo científico. El libro de Locke fue el blanco principal del obispo Berkeley, el padre del antirrealismo, quien quiso vindicar la realidad cotidiana mostrando que la idea abstracta de una materia incolora e insípida, favorecida por los realistas científicos, dependía enteramente de nuestra experiencia ordinaria de cosas coloridas y sabrosas. Al conceder que éstas en efecto dependen de la mente Berkeley convirtió la "vía de las ideas" de Locke en agua para su molino espiritualista, pero esta ingeniosa táctica introdujo en su vindicación del sentido común un equívoco que en parte es responsable de su persistente impopularidad.

Casi todos los realistas científicos de hoy son materialistas y están por ende más cerca de Hobbes que de Descartes; pero en todo caso siguen congelados en una mentalidad del siglo XVII. Paradójicamente, hablan siempre de la realidad del mundo *externo*, como si ellos mismos fuesen espíritus desencarnados que contemplan el mundo desde afuera. No obstante su ateísmo, profesan una visión de las cosas que sólo es concebible desde el punto de vista de un Dios omnisciente. La distancia cultural entre este realismo científico y la filosofía del siglo XX es tan enorme que una persona que se haya educado leyendo a Heidegger y Wittgenstein, fácilmente perderá la esperanza de que conversando con un realista científico pueda ponerlo al día. Con todo, en nuestra misma generación, el filósofo Hilary Putnam ha experimentado una conversión así, pasando -sin duda por iniciativa propia, y reflexionando por su cuenta sobre las cosas como son- de una versión más o menos vulgar de realismo científico a lo que él llama, con enfática redundancia, 'realismo pragmático'. Dice al respecto, en su libro *Los muchos rostros del realismo*:

> La clave para llevar a cabo el programa de preservar el realismo del sentido común y a la vez evitar los absurdos y antinomias del realismo metafísico en todas su variedades familiares (marca X: materialismo; marca Y: idealismo subjetivo; marca Z: dualismo...) es algo que he denominado *realismo interno* (pero debía haberlo llamado realismo pragmático). En el fondo éste consiste simplemente en insistir en que el realismo no es incompatible con la relatividad de los conceptos. (Putnam 1987, p. 17)

Pienso que esta manera de ver se ajusta muchísimo mejor que el llamado realismo científico a la ciencia tal como se la practica en realidad. Me temo, sí, que lo que voy a proponer en su defensa será juzgado por los realistas científicos

como una confesión o un manifiesto, edificante y tal vez placentero para quienes, por su deplorable educación, comparten mi punto de vista, pero alergénico y nada convincente para otros.

Los realistas científicos creen que la realidad está bien definida de una vez por todas, independientemente de la acción humana y del pensamiento humano, de una manera que puede articularse adecuadamente en el discurso humano. Creen también que el propósito primordial de la ciencia es desarrollar justamente ese género de discurso que articula adecuadamente la realidad -que, como decía Platón, la "corta en sus coyunturas" (*Fedro* 265e1)- y que la ciencia moderna esencialmente está logrando ese propósito. Me parece muy difícil aceptar ninguna de estas aseveraciones, o siquiera hallarles un sentido. La existencia de una realidad bien determinada es sin duda un corolario de la concepción monoteísta corriente de Dios, pero no tengo la más mínima base para pensar que la visión divina del mundo puede articularse en el discurso humano. La misma ocurrencia de que esa visión pueda expresarse en palabras me parece una muestra de provincianismo. Sostengo, además, que el discurso científico es sólo el aspecto verbal de la práctica científica y no puede seriamente justificarse separado de ésta; que dicho aspecto verbal no está más próximo a los fines de la ciencia que sus aspectos manipulativos; que la ciencia no tiene un fin *primordial* y que, como en cualquier otra actividad humana, el distingo entre medios y fines cambia continuamente de un contexto a otro, de modo que cualquier fin logrado acabará tarde o temprano -mientras estemos en posesión de él- siendo utilizado como un medio, mientras que la mayoría de nuestros medios en algún momento han sido fines. Bajo esta perspectiva la ciencia es, por así decir, la continuación del sentido común con otros medios, según lo requiere la situación práctica global. Cuando busco mi automóvil en un estacionamiento público tengo presente su apariencia visual pero no pienso ni por un instante en el intercambio de fotones que está ocurriendo entre el sol, el coche y, eventualmente, mi retina. Cuando reflexiono sobre el origen y la evolución del universo confundo el coche y mi cuerpo y todo lo demás en una sola masa cósmica homogénea. Y estos dos modos de articular la realidad -igual que muchos otros- son enteramente apropiados para orientarnos en ella en distintas ocasiones y con distintos propósitos.

Pero basta ya de generalidades. Unos pocos ejemplos tomados de la ciencia pretérita y actual aclararán, espero, estas ideas y respaldarán mi reclamación de que el realismo pragmático -y no la criptoteología nostálgica del realismo científico- es la concepción que mejor expresa la verdadera índole del conocimiento humano y la realidad como la entienden los científicos practicantes.

He aquí un argumento antirrealista bien conocido.

> *Primera premisa*: Cualquier conjunto de datos empíricos puede ser abarcado por muchas teorías físicas diferentes (esto es, incorporando ese conjunto de datos en distintas estructuras matemáticas).

Segunda premisa: Podemos preferir la teoría que juzguemos más simple, o más bonita, o más cómoda para calcular, pero no tenemos ninguna base para pensar que nuestras preferencias son compartidas por el Creador del universo, ni mucho menos para creer que prevalecieron cuando el universo surgió por casualidad.

Conclusión: Si la ciencia pretende establecer cuál es la verdadera estructura de la realidad basándose en datos empíricos se propone una tarea imposible.

La segunda premisa es obvia. La primera es más problemática. Se la demuestra fácilmente en el caso de la tarea teórica más sencilla, a saber, la de ajustar una curva a un conjunto de datos sobre dos variables correlacionadas. Los datos pueden entonces representarse mediante pequeños rectángulos en el plano e infinitas curvas diferentes pasaran por cualquier conjunto finito de tales rectángulos, no importa cuán pequeños sean y cuán densamente distribuidos estén. Uno se inclina a pensar que la multitud de las generalizaciones teóricas admisibles será mayor cuanto más complejos sean los datos que se pretende abarcar con ellas. Sin embargo, en la vida real no ocurre así. Aunque sea una verdad lógica que muchas teorías incompatibles podrían dar cuenta de todos los datos disponibles, de hecho no conocemos ninguna que lo haga. Lo que tenemos son teorías que dan cuenta *en parte* de alguna familia *específica* de fenómenos. Y cuando quiera que hay dos o más rivales en un mismo campo de estudios, pronto se descubren efectos que le dan la victoria a uno de ellos. Con todo, estas decisiones, aunque en absoluto inciertas, suelen basarse en consideraciones de belleza y comodidad. Por ejemplo, es difícil que los datos contraríen a una teoría que contenga varios parámetros ajustables, como la astronomía tolemaica o ciertos rivales modernos de la teoría einsteiniana de la gravitación. Pero el hecho mismo de que sean tan flexibles basta para condenarlas si hay otra teoría *sin parámetros ajustables* que concuerde con los datos. Este criterio de selección es natural si buscamos entender la realidad a la mano en el contexto de nuestra praxis, pero no veo cómo pudiéramos estar ciertos de que la realidad absoluta, tal como supuestamente está estructurada aparte de la historia y los intereses de los seres humanos, no estaría mejor descrita por una de esas teorías con parámetros ajustables que tan alegremente descartamos.

Clark Glymour (1977) ha estudiado un caso en que la vacilación entre presentaciones teóricas divergentes del mismo conjunto de datos no resulta de la imprecisión de éstos y no puede resolverse por consideraciones de belleza o comodidad. Aunque su ejemplo es puramente académico, es bastante instructivo. Supongamos por un momento que la Teoría General de la Relatividad de Einstein es la teoría verdadera del mundo. Esto significa que el mundo puede representarse como un "espacio-tiempo", esto es, un continuo de cuatro dimensiones $\mathfrak{M}$ dotado de una métrica g que satisface las ecuaciones de campo de Einstein[1]. Glymour probó que las ecuaciones de campo tienen soluciones

alternativas, *topológicamente incompatibles*, que sin embargo son *empíricamente indiscernibles* en el sentido preciso que explicaré ahora[2]. Para entender la explicación que voy a dar conviene recordar lo siguiente: en el continuo de cuatro dimensiones que representa el mundo, cada punto representa un posible suceso físico instantáneo y puntual; el *pasado* de un suceso A está formado por todos los sucesos de los cuales puede tenerse noticia en A, esto es, desde los cuales puede llegar al lugar de A, en o antes del instante en que ocurre a A, una señal trasmitida a la velocidad de la luz o a una velocidad menor. Por último, decimos que dos regiones métricamente estructuradas son isométricas si hay una correspondencia uno-a-uno entre los puntos de una y los puntos de la otra tal que la distancia entre cada par de puntos de una de las regiones es igual a la distancia entre el par de puntos correspondientes en la otra región]. Sean pues g_1 y g_2 dos soluciones de las ecuaciones de campo de Einstein, definidas respectivamente en los continuos $\mathfrak{M}_1$ y $\mathfrak{M}_2$. Diremos que las estructuras $<\mathfrak{M}_1,g_1>$ y $<\mathfrak{M}_2,g_2>$ son *empíricamente indiscernibles* (en un sentido débil) si para cada punto $p_1 \in \mathfrak{M}_1$ hay un punto $p_2 \in \mathfrak{M}_2$ tal que el pasado de p_1 es isométrico al pasado de p_2[3]. Glymour probó que en algunos pares de soluciones empíricamente indiscernibles de las ecuaciones de campo de Einstein, los continuos subyacentes son topológicamente distintos[4]. Como es obvio, todos los datos empíricos para la corroboración de hipótesis científicas tienen que tomarse del pasado de los actos de investigación científica[5]. Por lo tanto, si el mundo en que vivimos fuese topológicamente distinto pero observacionalmente indiscernible de otro modelo de mundo, tendríamos que vivir para siempre en la incertidumbre en lo que respecta a la forma del mundo, esto es, a su topología global. Tal incertidumbre sería por cierto fatal para las ambiciones epistémicas del realista científico, empeñado en obtener una visión de conjunto, "desde el punto de vista de Dios", de lo que consideran "el mundo externo". En cambio, este asunto le resulta completamente indiferente al realista pragmático que como ser-*en*-el-mundo busca entender la realidad a la mano. Según va pasando el tiempo, algunas de sus expectativas, basadas en datos extraídos de un pasado anterior, se revelarán engañosas, pero sólo a la luz de datos provenientes de su nuevo pasado. Por eso, puede aceptar que dos modelos empíricamente indiscernibles del universo, aunque sean topológicamente incompatibles entre ellos, constituyan para él dos representaciones epistémicamente equivalentes de una y la misma realidad[6].

Las tendencias antirrealistas difundidas en los últimos treinta años entre los historiadores y los sociólogos de la ciencia derivan su fuerza no de una disyunción *concebible* de teorías *imaginarias* entre las cuales no sería posible decidir porque son todas igualmente buenas, sino de la sucesión *efectiva* de teorías *reales*, que en su mayoría ya han sido rechazadas porque no son tan buenas como la última. Es inevitable pensar que aun la teoría que corrientemente se acepta no es lo suficientemente buena para ser definitiva y con toda probabilidad se verá superada. La representación teórica correcta de la realidad quedaría pues postergada para siempre. Contra esta conclusión se ha

alegado que, aunque la ciencia no acaba de dar en el blanco de la verdad sobre el mundo real, se le aproxima cada vez más. Esta idea de aproximación a la verdad existe en dos versiones: o bien suponemos que la realidad está ya lista al margen del proceso de investigación científica, el cual aspira a encontrar la verdad acerca de ella; o bien concebimos la verdadera articulación de la realidad como el límite al cual converge la sucesión de las teorías científicas, el cual está constituido por dicha sucesión al modo como un número real está constituido por una secuencia de Cauchy de racionales. La segunda versión es perfectamente aceptable para el pragmatista -de hecho, quien primero la propuso fue el propio Peirce- pero el realista científico sólo puede aceptar la primera. No repetiré los argumentos que se han formulado en pro y en contra de ambas versiones[7]. Consideremos sólo un buen ejemplo de "aproximación a la verdad" y veamos qué consuelo y aliento puede un realista científico obtener de él. Nadie negará que los químicos del siglo XIX obtuvieron valores excelentes para los pesos atómicos de muchos elementos. Nuestros propios valores son sólo un poco mejores. Pero las cantidades medidas por ellos se entienden ahora de un modo muy diferente. Ellos creían que estaban midiendo la masa de cada parte indivisible de uno de los elementos últimos de la materia. Nosotros ya no pensamos que las partes en cuestión sean realmente indivisibles, aun cuando, como ya no sabemos griego, seguimos llamándolas 'átomos'. Más significativa aún es esta otra diferencia: ahora entendemos que un peso atómico medido con los métodos del siglo XIX no es, por regla general, la masa de un átomo de una especie particular, sino el promedio ponderado de las masas de átomos de varias especies con las mismas propiedades químicas (varios isótopos), en las proporciones en que esas especies están normalmente mezcladas en nuestro medio ambiente. Desde nuestro punto de vista habría que decir que los químicos del siglo XIX midieron con buena aproximación *los números correctos*, mas *no de la cantidad que creían*[8].

Así el mismo modo cómo las teorías científicas se suceden y desplazan unas a otras ofrece poderosas razones para cuestionar la creencia del realista científico en que la ciencia se acerca cada vez más a una comprensión adecuada de la estructura autosubsistente, unívocamente determinada de la realidad. Peor aún: me parece que, aun cuando, en aras de la discusión, aceptamos que tal estructura absoluta existe, resulta que la ciencia tal como realmente se practica no está en el negocio de buscarla. Llego a esta conclusión cuando veo la forma como teorías discrepantes se aplican conjuntamente en la consideración de ciertos fenómenos y en la solución de ciertos problemas. Daré dos ejemplos.

El primero está tomado de la famosa carta de Stephen Hawking a la revista *Nature* sobre explosiones de hoyos negros (1974)[9]. Roger Penrose, Stephen Hawking y Robert Geroch probaron en los años 60 una serie de teoremas matemáticos que implican que cualquier universo relativista que cumpla con ciertos supuestos físicamente muy plausibles tiene que contener hoyos negros, esto es, regiones espacio-temporales en que el campo gravitacional es tan poderoso que de ellas no puede salir ninguna cantidad de materia o de radiación y

que cualquier porción de materia o de radiación que penetre en ellas queda allí capturada para siempre. En la carta citada Hawking analiza lo que ocurriría si la materia capturada en un hoyo negro obedece las leyes de la Mecánica Cuántica no relativista. Estas leyes implican que una partícula presa en un pozo de potencial tiene generalmente una probabilidad finita de escapar penetrando la barrera de potencial que la rodea. Tal penetración azarosa a través de barreras de potencial es la clave de la explicación mecánico-cuántica de la radioactividad, la cual se concibe como la expulsión repentina y sin causa de cuantos de materia y radiación desde el núcleo atómico al que normalmente están atados. Hawking aplicó la misma idea básica a los hoyos negros y calculó el tiempo que un hoyo negro de masa dada m se tardaría en evaporarse por completo. (Si *m* es la masa del sol, el tiempo en cuestión es del orden de 10^{63} años). Hay que subrayar (i) que la noción de hoyo negro surge en el contexto de la Relatividad General y conforme a esta teoría los hoyos negros no existen en el espacio-tiempo plano de Minkowski que subyace a la teoría cuántica de campos, mucho menos en el espacio-tiempo newtoniano que subyace a la Mecánica Cuántica no relativista, y (ii) que las ecuaciones de campo de Einstein no gobiernan un campo cuantizado, así que la Mecánica Cuántica no puede considerarse como una aproximación local a la Relatividad General. Por lo tanto, desde el punto de vista del realismo científico habría que decir que Hawking hizo su movida al fiado, utilizando a la vez la Relatividad General y la Mecánica Cuántica como sustitutos provisorios parciales e inexactos de una futura teoría cuántica de la gravitación que daría cuenta coherentemente de la existencia de hoyos negros y de la forma como se evaporan. Por cierto, la ciencia, como cualquier otra empresa, tiene necesidad del crédito, y algunos metodólogos hasta *exigen* que toda teoría nueva emita pagarés redimibles con observaciones y experimentos *futuros*. Pero pedir crédito para una *teoría* futura, que no se ha *formulado* siquiera, a la cual se espera que se aproximen dos teorías mutuamente incompatibles y, según los criterios del realismo científico, patentemente falsas, no es una conducta que pueda sensatamente atribuirse a una persona razonable. Me parece, por eso, que la práctica de Hawking no puede entenderse en los términos del realismo científico, sino que debe vérsela simplemente como aquello que declaraba ser, esto es, la solución mediante las teorías más idóneas que había disponibles, de un problema surgido en la investigación de hoyos negros (específicamente, al querer asignarles una temperatura)[10].

El estudio de Hawking sobre la evaporación de hoyos negros arroja mucha luz sobre mi planteamiento porque combina teorías incompatibles, diría yo, descaradamente. Pero un realista científico podría cuestionar su pertinencia porque ni siquiera es muy seguro que los hoyos negros existan. Por eso voy a proponer otro ejemplo que, aunque menos extremo que el anterior, concierne a un objeto cuya realidad no cuestiona nadie, el planeta Mercurio. Para evitar complicaciones inútiles voy a suponer que ningún astro gana o pierde masa, al menos en forma significativa, durante el lapso de tiempo que estamos considerando. Según la teoría de la gravedad de Newton, si Mercurio estuviera a

solas con el sol trazaría una y otra vez la misma elipse, de diámetro y excentricidad dados, con uno de sus focos en el centro de gravedad del sistema Mercurio-sol. Esta elipse es lo que llamaré -con cierto abuso de lenguaje- la órbita kepleriana de Mercurio (la órbita de hecho propuesta por Kepler era una elipse con un foco en el centro del sol). La trayectoria observada del planeta se aparta ligera pero sostenidamente de su órbita kepleriana. Relativamente al sistema geocéntrico de coordenadas en que se registran las observaciones astronómicas, el perihelio de Mercurio -el punto de la trayectoria en que el planeta está más cerca del sol- avanza anualmente un poco menos de 1 minuto de arco (cerca de 56"). Casi un 90% de este avance se explica por la precesión general de los equinoccios y se debe, pues, a la elección de un sistema geocéntrico de coordenadas. Pero, según la teoría de Newton, el 10% restante tiene que deberse a la gravedad. La mayor parte de esta cantidad -unos 5.3" anuales o 530" por siglo- fue derivada con los métodos de la mecánica celeste clásica como efecto de la interacción entre Mercurio y los demás planetas. Queda, sin embargo, un saldo pequeño pero ineludible de aproximadamente 43" de arco por siglo que nunca fue explicado satisfactoriamente por la teoría newtoniana. El 24 de diciembre de 1907, Einstein le escribió a su amigo Conrad Habicht que estaba trabajando en un estudio relativista de la ley de gravedad con el que esperaba "explicar la todavía inexplicada variación secular en el perihelio de Mercurio"[11]. El motivo principal de su estudio no era, ciertamente, esta pequeña anomalía astronómica, sino el conflicto entre la teoría conocida ahora como Relatividad Especial, que Einstein introdujo en 1905 para dar cuenta de la electrodinámica de los cuerpos en movimiento, y la teoría newtoniana de la gravedad que era considerada, con razón, por todo el mundo como la teoría mejor confirmada de la física[12]. Como es sabido, en la teoría newtoniana la acción gravitacional se propaga instantáneamente a través de todo el espacio infinito, mientras que en la Relatividad Especial ninguna clase de información puede trasmitirse a una velocidad superior a la de la luz. La investigación de Einstein, iniciada en 1907, culminó en noviembre de 1915, cuando en cuatro semanas febriles le comunicó a la Academia Prusiana de Ciencias tres diferentes teorías de la gravedad. La sucesión semanal de teorías se interrumpió en la tercera semana del mes, cuando Einstein dedujo la parte inexplicada del avance del perihelio de Mercurio de una solución aproximada de las ecuaciones de campo que había propuesto en la segunda semana[13]. Einstein comunicó recién en la cuarta y última semana de noviembre de 1915 lo que hoy día llamamos las Ecuaciones de Campo de Einstein de la Relatividad General. Pero aunque estas ecuaciones difieren en su forma matemática y en su significado físico de las ecuaciones de la segunda semana, los dos sistemas de ecuaciones concuerdan en el espacio vacío que recorren los planetas, y por eso la solución de la anomalía de Mercurio, basada en la teoría de la segunda semana se trasmite incólume a la teoría de la cuarta. Luego la primera solución exacta de las ecuaciones de campo de Einstein, descubierta independientemente por Schwarzschild y por Droste a comienzos de 1916, confirmó plenamente la

solución de la anomalía de Mercurio y ha sido considerada desde entonces como una de las "tres pruebas clásicas" de la Relatividad General (las otras dos son la desviación de la luz estelar en el campo gravitatorio del sol y el corrimiento del espectro con las variaciones de potencial gravitacional). Para entender como opera esta prueba hay que recordar que en la Relatividad General la gravedad se concibe como una propiedad del espacio-tiempo comparable a la curvatura gaussiana de las superficies, regida por el tensor de Riemann sobre el espacio-tiempo. Una partícula de prueba -esto es, una partícula material tan insignificante que no contribuye nada al campo gravitacional- describe una geodésica (esto es una línea de dirección constante) en el espacio-tiempo. Las ecuaciones de campo de Einstein presentan a un lado el tensor de Ricci, formado por contracción del tensor de Riemann sobre dos pares de índices, y al otro lado un tensor construido a partir del tensor de tensión y energía que representa la distribución espacio-temporal de la materia. En ausencia de materia, Ricci = 0. La anomalía de Mercurio se supera resolviendo esta ecuación, que figura también en la teoría de la gravedad -por lo demás tan diferente- propuesta por Einstein en su segunda comunicación de noviembre de 1915. Supongamos, pues, que la métrica espacio-temporal es esféricamente simétrica en el espacio y que Ricci = 0 en todas partes salvo una pequeña región alrededor del eje de simetría. Las ecuaciones de campo de Einstein pueden entonces resolverse exactamente. La solución, que envuelve una constante de integración habitualmente designada $2m$, está definida en todas partes excepto sobre el eje de simetría[14]. Si tomamos m igual a la masa del sol, una partícula de prueba que se mueva por el espacio vacío con la velocidad de Mercurio a una distancia del eje de simetría igual a la distancia de Mercurio al sol, tendrá una trayectoria espacial muy similar a la órbita kepleriana de Mercurio (con un foco en el eje de simetría), difiriendo de ésta en cuanto el punto en que la trayectoria está más cerca del eje de simetría avanza en cada vuelta a razón de 43" por siglo. Así, la precesión secular del perihelio de Mercurio, inexplicada en la teoría de la gravedad de Newton, se deduce de la teoría de Einstein. Pero no perdamos de vista cómo se logra este resultado. Mercurio, un trozo de materia más o menos tan denso como la tierra, contenido en una superficie por lo menos tan grande como la de Asia y Africa sumadas, es concebido como una partícula de masa desdeñable, cuya presencia y movimiento no afecta en lo más mínimo la perfecta simetría esférica del campo gravitacional. Este Mercurio idealizado, puesto en un lugar apropiado del campo de un sol completamente solitario, exhibirá, según la teoría de Einstein, la precesión hasta entonces inexplicada de 43" por siglo; pero evidentemente no exhibirá la precesión de 530" por siglo que la mecánica celeste newtoniana derivaba de la interacción gravitacional de Mercurio con los demás planetas: en el campo simétrico de Schwarzschild, fuera de la fuente situada en el eje de simetría, todos los objetos materiales tienen que ser partículas de prueba que, por definición, no pueden ejercer ninguna acción gravitacional sobre las otras. Y, por supuesto, ni Einstein, ni Schwarzschild, ni Droste estaban en condiciones de resolver siquiera aproximadamente las ecuaciones de campo de Einstein para

un sistema de 10 cuerpos[15]. En su solución del problema de Mercurio los relativistas simplemente ignoraron la precesión secular de 530" porque daban por descontado que, dadas las circunstancias, era posible explicarla con la teoría newtoniana y podían suponer con seguridad que una teoría relativista del sistema solar completo, si estuviera disponible, daría predicciones concordantes con las predicciones newtonianas dentro de un margen de error aceptable. Ahora bien, un realista científico puede sentirse enteramente a gusto con este arreglo si supone que la Relatividad General es la teoría física definitiva de todas las cosas. En tal caso es lícito, desde su punto de vista, describir el movimiento de Mercurio recurriendo primero al modelo idealizado de Schwarzschild porque la masa de Mercurio es pequeña al punto de ser desdeñable; luego a la aproximación newtoniana porque la contribución de los otros planetas al campo gravitacional es suficientemente pequeña (aun cuando, obviamente, no es desdeñable), y finalmente sumando los resultados. Pero si la Relatividad General no es la teoría definitiva el ejemplo del movimiento de Mercurio no difiere esencialmente de mi ejemplo anterior de la evaporación de hoyos negros: un problema de otro modo intratable se resuelve con un margen de imprecisión consistente con los errores de observación, aplicando dos teorías conceptualmente muy distintas, irreconciliables desde el punto de vista de Dios.

Mis dos ejemplos proceden del área de la física que conozco mejor; pero estoy convencido de que sería posible encontrar ejemplos similares también en otras áreas. En particular, la interpretación de resultados experimentales depende ostensiblemente de las teorías empleadas en el diseño de las distintas partes del equipo utilizado en el experimento. Estas son generalmente teorías antiguas, habitualmente ajenas a la teoría de vanguardia que el experimento está llamado a poner a prueba y en último término incompatibles con ella. Incluso hay metodólogos que piensan que hay un círculo vicioso en utilizar instrumentos diseñados a la luz de una teoría, para ponerla a prueba. No creo que tengan razón, pero es un hecho que todo el tiempo se hacen experimentos con equipo construido con arreglo a teorías antiguas para corroborar o refutar teorías nuevas que socavan la base de aquellas. El realista científico puede por cierto suponer que el experimento entero podrá reinterpretarse satisfactoriamente en los términos de la teoría nueva, pero, como expliqué arriba, esto es vivir al fiado. El pragmatista, por cierto, no necesita alimentarse de esperanzas fantásticas y puede arreglárselas de día en día con lo que está realmente disponible, porque acepta de buen grado que la física, como cualquier otra empresa humana importante, es un asunto variopinto, que se improvisa andando.

Notas

† En mayo de 1995, leí en la reunión de la Académie Internationale de Philosophie des Sciences en Parma una versión algo más breve de este trabajo, en inglés. Se publicará en las actas de esa reunión con el título "Scientific realism and scientific practice".

1 Para no causar pánico innecesariamente, digo 'un continuo' en vez de usar el término técnico 'una variedad diferenciable'.

2 Digo que dos soluciones de las ecuaciones de campo de Einstein son *topológicamente incompatibles* si los espacio-tiempos respectivos no son homeomorfos. Dos espacios topológicos V y W son *homeomorfos* si hay una biyección continua h: $V \to W$ cuya inversa h^{-1}: $W \to V$ es asimismo continua.

3 Esta definición de indiscernibilidad empírica se debe a Malament (1977). La relación así definida no es simétrica. Para que la relación fuera simétrica Glymour definió originalmente un concepto más fuerte. Pero a un observador que quiera decidir sobre la base de los datos disponibles cuál de dos modelos topológicamente incompatibles de la Relatividad General representa el mundo en que vive, no le importa si la relación es simétrica o asimétrica: toda decisión es imposible si el modelo que corresponde a su mundo es empíricamente indiscernible del otro, aun en sentido débil.

4 Glymour pudo conducir su prueba rigurosamente y en abstracto, sin atender a una determinada distribución hipotética de la materia, porque hay una relación topológica precisa entre los continuos en cuestión, a saber, o bien uno es un espacio cobertor del otro, o hay un espacio cobertor común a ambos. El concepto de espacio cobertor puede definirse así: si A y B son espacios topológicos, A es un espacio cobertor de B si existe un *mapa cobertor* f: $A \to B$, esto es, una aplicación continua de A sobre B que cumple el requisito siguiente: cada punto $p \in B$ tiene un entorno abierto U cuya imagen inversa $f^{-1}(U)$ es una unión de conjuntos abiertos disjuntos de A, cada uno de los cuales es aplicado homeomórficamente sobre U por f.

5 Para facilitar las cosas, la prueba de Glymour se refiere al llamado pasado *cronológico* de los puntos en cuestión, que comprende, para cada punto p, todos los puntos a los que se llega desde p siguiendo alguna curva temporaloide dirigida al pasado. Por cierto, la fuente de los datos empíricos accesibles en p está contenida en el pasado *causal* de p, esto es, el conjunto de todos los puntos a los que se llega desde p siguiendo alguna curva temporaloide o nula dirigida al pasado.

6 Un ejemplo sencillo, aunque traído de los cabellos, puede aclararnos lo que aquí está en juego. Piénsese en la fantasía nietzscheana del eterno retorno. Supongamos que el mundo de Nietzsche era espacialmente euclidiano. ¿Qué forma le atribuiremos entonces a su espacio-tiempo? O bien equivale topológicamente a $\mathbf{S} \times \mathbf{R}^3$, y cada uno de nosotros vive de nuevo los mismos sucesos una y otra vez, o bien equivale topológicamente a $\mathbf{R}^4$, y cada uno de nosotros vive infinitas vidas sucesivas distintas pero indiscernibles. Pragmáticamente no hay ninguna diferencia entre estas dos descripciones. Obsérvese que $\mathbf{R}^4$ es un espacio cobertor de $\mathbf{S} \times \mathbf{R}^3$.

7 Véase, por ejemplo, Laudan (1984), Kitcher (1993).

8 Del mismo modo, confío en que dentro de quinientos años las mediciones de la radiación de microondas de trasfondo efectuadas por nuestros contemporáneos serán juzgadas como excelentes aproximaciones, hasta el decimal que ahora estimamos haber alcanzado. Pero no estoy tan seguro de que la interpretación del fenómeno como vestigio del universo inicialmente muy denso y muy caliente favorecido por la cosmología actual siga siendo aceptada y no sea desplazada por una idea completamente diferente.

9 Véase también Hawking (1975, 1976), y su artículo en el *Scientific American* (1977).

10 Hawking and Israel (1979, pp. 17-18) describen este problema así:

> (...) the area of the event horizon of a black hole has the property that it can only increase and not decrease with time. This led Beckenstein in 1972 to suggest that it might be connected with the thermodynamic quantity, entropy, which measures the degree of disorder of a system or one's lack of knowledge of it. He pointed out that the 'no-hair theorem' implied that a very large amount of information about a star was irretrievably lost when it collapsed to form a black hole and he claimed that the area of the event horizon was a measure of this unobservable information which could be regarded as the entropy of the black hole. Other analogies between classical black holes and thermodynamics were found by Bardeen, Carter and Hawking (1973) but there was an apparently insurmountable obstacle to attributing a finite entropy to a black hole because that would imply that it should have a finite temperature and should be able to remain in equilibrium with thermal radiation at the same temperature. However this seemed impossible because the black hole would absorb some of the radiation but, by its very definition, it would not be able to emit anything in return.
>
> The paradox remained until Hawking (1974) discovered that applying quantum mechanics to matter fields in the background geometry of a black hole metric led to a steady rate of particle creation and emission to infinity. The emitted particles would have a thermal spectrum with a temperature proportional to the surface gravity of the black hole, which is a measure of the strength of the gravitational field at the event horizon and which is inversely proportional to the mass. This emission would enable the black hole to remain in equilibrium with thermal radiation at the same temperature.

11 Einstein, GP 5, 82.

12 En 1913, ante la 85ª *Naturforscherversammlung* en Viena, Einstein dijo que las leyes newtonianas "de la gravedad y del movimiento de los cuerpos celestes (...) se han mostrado tan exactamente correctas que, desde el pundo de vista de la experiencia, no hay ninguna razón decisiva para dudar de su validez estricta" (Einstein 1913, p. 1249).

13 Este trabajo de Einstein ha sido analizado en detalle por Earman y Janssen (1993).

14 En las coordenadas polares (r,φ,θ,t) empleadas por Schwarzschild, la solución también está indefinida en la hipersuperficie $r = 2m$ (si se emplean unidades tales que la constante de gravedad es igual a 1). Pero esta singularidad puede eliminarse adoptando otras coordenadas y es, por ende, inesencial. La singularidad en el eje de simetría $r = 0$ es esencial.

15 He adoptado un punto de vista desde el cual Einstein y sus contemporáneos podían sostener en 1916 que la anomalía de la precesión del perihelio de Mercurio se había resuelto. Hoy en día es posible calcular las trayectorias de un sistema de partículas que se mueven lentamente, ligadas por interacción gravitacional, tales como el sol y los planetas, mediante lo que se llama el formalismo parametrizado post-newtoniano (PPN). Como los métodos perturbacionales de la mecánica celeste clásica, este es un método de cálculo aproximado que, además, es neutral entre varias teorías cronogeométricas de la gravedad, arrojando las predicciones de una teoría determinada cuando ciertos parámetros se ajusta de cierta manera (véase la tabla en Will 1981, p. 117). La Relatividad General pone dos de estos parámetros iguales a 1 y los demás iguales a 0, pero esta situación aparentemente privilegiada pudiera deberse a que el formalismo PPN proviene de los trabajos de Einstein y sus colaboradores, encaminados a derivar las ecuaciones del movimiento de esa teoría.

BIBLIOGRAFIA

Bardeen, J.M., B. Carter, S.W. Hawking: 1973, 'The four laws of black hole mechanics', *Communications in Mathematical Physics* 31, 161-170.

Beckenstein, J.D.: 1973, 'Black holes and entropy', *Physical Review D* 7, 2333-2346.

Droste, J.: 1916, 'The field of a single centre in Einstein's theory of gravitation, and the motion of a particle in that field', *K. Nederlandse Akademie van Wetenschappen. Proceedings* 19, 197-215.

Earman, J., M. Janssen: 1993, 'Einstein's Explanation of the Motion of Mercury's Perihelion', in J. Earman, M. Janssen, J. Norton (eds.): *The Attraction of Gravitation: New Studies in the History of General Relativity*, Boston, Birkhäuser, pp. 129-172.

Einstein, A.: CP, *The Collected Papers of Albert Einstein*, Princeton, Princeton University Press, 1987-.

Einstein, A.: 1905, 'Zur Elektrodynamik bewegter Körper', *Annalen der Physik* (4) 17, 891-921.

Einstein, A.: 1913, 'Zum gegenwärtigen Stand des Gravitationsproblems', *Physikalische Zeitschrift* 14, 1249-1266.

Einstein, A.: 1915a, 'Zur allgemeinen Relativitätstheorie', *K. Preussische Akademie der Wissenschaften. Sitzungsberichte*, pp. 778-786.

Einstein, A.: 1915b, 'Zur allgemeinen Relativitätstheorie (Nachtrag)', *K. Preussische Akademie der Wissenschaften. Sitzungsberichte*, pp. 799-801.

Einstein, A.: 1915c, 'Erklärung der Perihelbewegung des Merkur aus der allgemeinen Relativitätstheorie', *K. Preussische Akademie der Wissenschaften. Sitzungsberichte*, pp. 831-839.

Einstein, A.: 1915d, 'Die Feldgleichungen der Gravitation', *K. Preussische Akademie der Wissenschaften. Sitzungsberichte*, pp. 844-847.

Galileo Galilei: EN, *Le opere*, Nuova ristampa della Edizione Nazionale. Firenze, G. Barbera, 1964-1966. 20 vols.

Glymour, C.: 1977, 'Indistinguishable space-times and the fundamental group', in Earman et al.: *Foundations of Space-Time Theories*, Minneapolis, University of Minnesota Press, pp. 50-59.

Hawking, S.W.: 1974, 'Black hole explosions?', *Nature* 248, 30-31.

Hawking, S.W.: 1976, 'Black holes and thermodynamics', *Physical Review D* 13, 191-197.

Hawking, S.W.: 1975, 'Particle creation by black holes', *Communications in Mathematical Physics* 43, 199-220.

Hawking, S.W.: 1977, 'The quantum mechanics of black holes', *Scientific American* 236 (1), 34-40.

Hawking, S.W., W. Israel (eds.): 1979, *General Relativity: An Einstein Centenary Survey*, Cambridge, Cambridge University Press.

Kitcher, P.: 1993, *The Advancement of Science: Science without Legend, Objectivity without Illusions*, New York, Oxford University Press.

Laudan, L.: 1981, 'A confutation of convergent realism', *Philosophy of Science* 48, 19-48.

Malament, D.: 1977, 'Observationally indistinguishable spacetimes: Comments on Glymour's paper", in Earman et al.: *Foundations of Space-Time Theories*, Minneapolis, University of Minnesota Press, pp. 61-80. (Minnesota Studies in the Philosophy of Science 8).

Putnam, H.: 1987, *The Many Faces of Realism*, The Paul Carus Lectures, LaSalle, IL, Open Court.

Schwarzschild, K.: 1916, 'Über das Gravitationsfeld eines Massenpunktes nach der Einsteinschen Theorie', *K. Preussische Akademie der Wissenschaften. Sitzungsberichte*, pp. 189-196.

Will, C.M.: 1981, *Theory and Experiment in Gravitational Physics*, Cambridge, Cambridge University Press.

Roberto Torretti nació en Santiago de Chile en 1930. Enseñó filosofía en las Universidades de Concepción (Chile), de Chile y de Puerto Rico. Por quince años dirigió la revista *Diálogos*. Es autor de los siguientes libros: *Manuel Kant: Estudio sobre los fundamentos de la filosofía crítica* (Santiago de Chile 1967); *Philosophy of Geometry from Riemann to Poincaré* (Dordrecht 1978); *Relativity and Geometry* (Oxford 1983) *Creative Understanding: Philosophical Reflections on Physics* (Chicago 1990); *La geometría del universo y otros ensayos de filosofía natural* (Mérida de los Andes 1994) y, en colaboración con Carla Cordua, *Variedad en la Razón: Ensayos sobre Kant* (Río Piedras 1992).